中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

膨润土黏结剂对活性焦脱硝性能的影响

王宇航[1,2,3],孙仲超[1,2,3],熊银伍[1,2,3],张浩强[1,2,3]

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013;2. 煤基节能环保炭材料北京市重点实验室,北京 100013;
3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

摘 要:为研究膨润土作为黏结剂对活性焦性能的影响,制备了原料中膨润土质量分数分别为 0、10%、20%、30%、40% 的活性焦。通过常规指标分析、N_2 吸附-脱附法、固定床脱硝评价分别考察了不同质量分数膨润土对活性焦碘值、灰分、装填密度、耐磨强度、耐压强度、孔隙结构、脱硝效率等性能的影响。结果表明,膨润土可以替代部分高温煤焦油作为制备活性焦的黏结剂,加入量≤20% 时,活性焦的碘值、装填密度、孔隙发达程度以及脱硝效率均有提升;活性焦的灰分和耐压强度受膨润土黏结剂的影响显著,加入量由 0 增至 40%,灰分从 7.76% 增至 30.75%,耐压强度从 682 N 降至 114 N;膨润土加入量为 20% 时活性焦性能较好,碘值 406 mg/g,装填密度 616 g/L,灰分 19.33%,耐压强度 375 N,耐磨强度 95.4%,比表面积 329.70 m^2/g,脱硝效率 73.2%。

关键词:活性焦;膨润土;黏结剂;脱硝;煤焦油

中图分类号:TQ536;TD713 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-6772(2018)06-0077-06

Effect of bentonite binder on denitrification performance of activated coke

WANG Yuhang[1,2,3],SUN Zhongchao[1,2,3],XIONG Yinwu[1,2,3],ZHANG Haoqiang[1,2,3]

(1. *Coal Chemistry Branch of China Coal Research Institute*, *Beijing* 100013, *China*; 2. *Beijing Key Laboratory of Coal Based Carbon Materials*, *Beijing* 100013, *China*; 3. *State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization*, *Beijing* 100013, *China*)

Abstract: Activated coke samples with different content of bentonite, i. e., 0, 10%, 20%, 30% and 40%, was prepared to study the effect of bentonite binder on denitrification performance of activated coke. The effects of different mass fraction bentonite on iodine value, ash content, loading density, abrasion resistance, compressive strength, pore structure and denitrification efficiency were investigated by conventional index analysis, N_2 adsorption-desorption method and denitrification evaluation in a fixed bed. The results show that bentonite can replace part of high temperature coal tar as binder for preparing active coke. When the addition amount is less than 20%, the iodine value, loading density, pore development degree and denitrification efficiency of active coke are improved. Meanwhile, the ash content and compressive strength of active coke are significantly affected by bentonite binder. Specifically, the ash content increases from 7.76% to 30.75% and the compressive strength decreases from 682 N to 114 N with the addition amount of bentonite increasing from 0 to 40%. The performance of active coke with 20% bentonite is best, and the iodine value, loading density, ash content, compressive strength, abrasion resistance, specific surface and denitrification efficiency are 406 mg/g, 616 g/L, 19.33%, 375 N, 95.4%, 329.70 m^2/g and 73.2%, respectively.

Key words: activated coke; bentonite; binder; denitrification; coal tar

0 引 言

近年来我国颁布了一系列国家/行业标准,对火电厂、燃煤锅炉、钢铁烧结、炼焦化学等行业排放烟气中大气污染物的管控力度加大。活性焦干法烟气净化技术可实现烟气中 SO_2、NO_x、重金属等污染物

收稿日期:2018-07-26;**责任编辑**:白娅娜 **DOI**:10.13226/j.issn.1006-6772.18072601

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600400)

作者简介:王宇航(1991—),男,山西大同人,研究实习员,硕士,从事煤基炭材料及烟气净化研究工作。E-mail:497081920@qq.com

引用格式:王宇航,孙仲超,熊银伍,等. 膨润土黏结剂对活性焦脱硝性能的影响[J]. 洁净煤技术,2018,24(6):77-82.
WANG Yuhang, SUN Zhongchao, XIONG Yinwu, et al. Effect of bentonite binder on denitrification performance of activated coke[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 77-82.

移动阅读

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

的联合脱除,是实现烟气排放标准的有效技术手段[1-3],且凭借水资源消耗少、SO_2 可资源化利用、无二次污染、吸附剂无害化循环利用等特点,得到迅猛发展[4]。脱硫脱硝活性焦作为干法烟气净化技术的吸附剂是技术的关键,其制备过程中成型工序需加入质量分数 30% ~40% 的高温煤焦油作为黏结剂[5]。目前,高温煤焦油价格在 4 000 元/t 左右,占原料成本近 50%,成为制约总体经济性的最大因素,因此探索优质廉价的黏结剂非常重要。田斌等[6]、张香兰等[7]分别以煤沥青和膨化淀粉复合、聚乙烯醇作为黏结剂制得了比表面积较高、吸附性能较好的柱状活性炭,所得样品的强度仅在 70% 以上。丁佳丽[8]自主研发了非沥青黏结剂 NPA 用于活性炭制备,制得了微孔结构更为发达、机械强度达 89% 的煤基活性炭。总体来看,目前利用非沥青类黏结剂制得活性炭虽可获得较高比表面积和较优吸附性能,但产品机械强度不足,不利于工业化应用。

膨润土是以蒙脱石为主要矿物成分的非金属矿产,具有良好的热稳定性和化学活性,国外已在工农业生产 24 领域 100 多个部门中应用,有 300 多个产品,在国内广泛应用于型煤工业中的复合黏结剂组分[9],价格较高温煤焦油低 70% 以上,但目前鲜见膨润土作为黏结剂应用于活性焦工业的报道。张秋利等[10]以年轻烟煤为原料、膨润土为黏结剂制备型煤时发现,膨润土含量为 7%、水分 14% ~16% 时,型煤平均抗压强度高达 1 420 N。郭振坤等[11]认为,膨润土可通过物理吸附作用与煤粒充分接触,形成大量絮凝体结构单元,包裹煤粒进而提高型煤的冷强度、热强度、热稳定性等性能;热解温度达到 461 ℃时形成较明显的失重速率峰。上述学者研究结果对膨润土用于活性焦制备过程中的成型、炭化等工序均具有借鉴意义。本文在目前市售脱硫脱硝活性焦生产原料煤配比的基础上,考察了膨润土黏结剂对活性焦碘值、灰分、装填密度、耐磨强度、耐压强度、孔隙结构、脱硝效率等性能的影响,以期为膨润土作为黏结剂应用于活性焦工业提供依据。

1　试　　验

1.1　试验原料

试验选用 A、B、C、D 四种原料制备活性焦样品,原料工业分析、元素分析、镜质组平均最大反射率见表 1。

表 1　原料的工业分析、元素分析、黏结指数和镜质组平均最大反射率

Table 1　Proximate analysis, ultimate analysis, caking index and mean maximum reflectance of vitrinite of coal sample

原料	工业分析			元素分析				$G_{R.I}$	$\overline{R}_{o,max}$/%
	M_{ad}/%	A_d/%	V_{daf}/%	C_{daf}/%	H_{daf}/%	O_{daf}/%	$S_{t,d}$/%		
A	7.90	5.94	7.50	94.19	3.88	2.30	0.28	0	2.775
B	5.82	3.58	36.99	81.84	4.70	11.83	0.36	0	0.623
C	2.19	10.47	27.11	87.13	5.10	4.73	0.67	77	1.079
D	3.16	13.46	11.59	81.24	1.78	2.33	0.46	0	—

由表 1 可知,4 种原料的干燥无灰基挥发分分别为 7.50%、36.99%、27.11%、11.59%,黏结指数分别为 0、0、77、0,只有原料 C 有较强的黏结性,原料 A、B、C 的镜质组平均最大反射率分别为 2.775%、0.623%、1.079%。

对试验使用膨润土进行成分全分析,结果见表 2。由表 2 可知,膨润土的主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3,SiO_2 含量为 65.68%,Al_2O_3 含量为 14.38%,Fe_2O_3 含量也较高,为 4.34%,水分为 2.48%,烧灼减量为 6.34%。

表 2　膨润土成分全分析

Table 2　Composition analysis of bentonite

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	MnO_2	SO_3	P_2O_5	H_2O	K_2O
含量/%	65.68	14.38	4.34	0.57	1.50	1.72	0.83	0.07	0.22	0.14	2.48	2.50

1.2　样品制备

活性焦样品经过原料配煤、制粉、捏合、炭化、活化等工艺制得,具体流程如图 1 所示。

采用颚式破碎机将 4 种煤样分别破碎至 6 ~

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

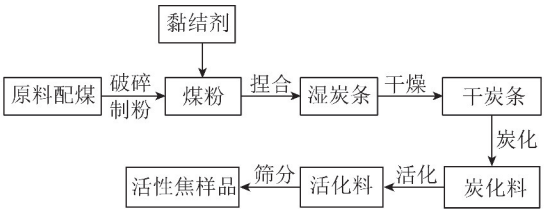


图 1　活性焦样品制备工艺流程

Fig. 1　Preparation process of activated coke

12 mm,再经球磨机使煤样磨至 98% 通过 0.074 mm 筛网。在捏合机中同时加入一定比例的无烟煤、长焰煤、焦煤、兰炭和适量黏结剂捏合一定时间,形成混合均匀的膏状物料,利用四柱液压机将捏合后的膏状物料通过模具压制成条(ϕ9 mm),并切成长度 10 ~ 12 cm 的料条。

活性焦炭化、活化过程均在外热式回转炉中进行,升温速度均采用程序升温控制仪精确控制。活化采用工业上最常用的物理活化法,活化剂为过热水蒸气,用计量泵控制。将料条装入回转炉内,以 5 ℃/min 升温速率升至 650 ℃,保温 60 min 后取出放入充氮容器内自然冷却,制成炭化料。炭化料在升温至 850 ℃的回转炉内,以 2.4 mL/(g · h)通入水蒸气,保温 30 min 后取出,置于充氮容器内自然冷却,制成活性焦样品。

试验中以膨润土和高温煤焦油作为复合黏结剂,黏结剂加入总量为膏状物料质量的 40%,二者加入量见表 3,其中样品 S0 仅以高温煤焦油作为黏结剂,样品 S4 仅以膨润土作为黏结剂,5 个样品的原料煤配比均相同。

表 3　5 种样品的黏结剂加入量

Table 3　Amount of binder added to samples

样品	黏结剂加入量/%	
	膨润土	高温煤焦油
S0	0	40
S1	10	30
S2	20	20
S3	30	10
S4	40	0

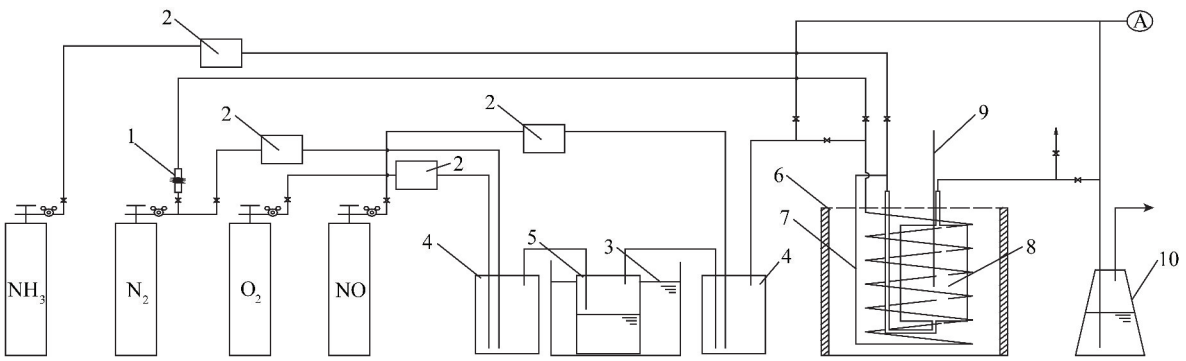
1.3　样品检测方法

试验中样品的理化分析检测包括碘值、灰分、装填密度、耐磨强度、耐压强度等指标,分别按照 GB/T 7702—2008《煤质颗粒活性炭试验方法》进行。

试验中使用美国康塔仪器公司的 Autosorb-1 气体吸附仪通过低温氮气吸附-脱附方法测定各样品的比表面积、孔容积等孔结构参数。样品经过 300 ℃脱气 4 h 后,置于被 77 K 液氮浸没的样品管中分析,得到其对 N_2 的吸附/脱附等温线,并利用 BET 方程及密度函数理论(density functional theory, DFT)解析得到样品的 BET 比表面积和孔容积等孔结构参数。

1.4　脱硝性能评价

利用实验室自行搭建的固定床反应器评价样品的脱硝性能,评价装置如图 2 所示。



1—转子流量计;2—质量流量计;3—可控温水浴;4—混合瓶;5—水蒸气发生器;
6—坩锅电阻炉;7—盘管;8—反应器;9—热电偶;10—尾气吸收瓶

图 2　脱硝性能评价装置示意

Fig. 2　Evaluation device for denitrification

整个装置分为配气系统、固定床反应器、尾气评价及处理系统,其中配气系统由高压钢瓶气提供 N_2、O_2、NO、NH_3 等气体,通过水蒸气发生器产生水蒸气;固定床反应器的内径为 54 mm,有效高度即活性焦样品装填的高度约为 440 mm,通过电加热、控温;反应后的气体通过红外在线分析仪进行检测,尾

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

气吸收瓶处理后排空。

试验中配制的混合气体包括 NO、O_2、水蒸气、NH_3 和 N_2，总流量为 0.40 Nm^3/h，其中 NO 体积分数 0.03%，NH_3 体积分数 0.03%，O_2 体积分数 6%，水蒸气体积分数 10%，N_2 作为平衡气体。固定床反应器的样品装填量为 1 L，当床层温度达到反应温度 120 ℃并稳定 0.5 h 后，通入混合均匀的气体开始脱硝评价反应，定时测定并记录出口气体中 NO_x 浓度，当连续 3 h 尾气中 NO_x 体积分数测量值偏差不超过 5×10^{-6}，且处于均值附近波动时，认为进入脱硝稳定段，停止试验。

采用 NO 转化率 η 表征样品的脱硝效率，计算公式为

$$\eta = (\varphi_0 - \varphi_1)/\varphi_0 \times 100\% \qquad (1)$$

式中，η 为脱硝率，%；φ_0 为原料气中 NO_x 体积分数，%；φ_1 为试验终止时尾气中 NO_x 体积分数，%。

2　结果与分析

2.1　膨润土黏结剂对活性焦样品理化性能的影响

2.1.1　对碘值、装填密度的影响

试验对 5 种活性焦样品的碘值和装填密度进行检测，考察了膨润土加入量对碘值和装填密度的影响，结果如图 3 所示。

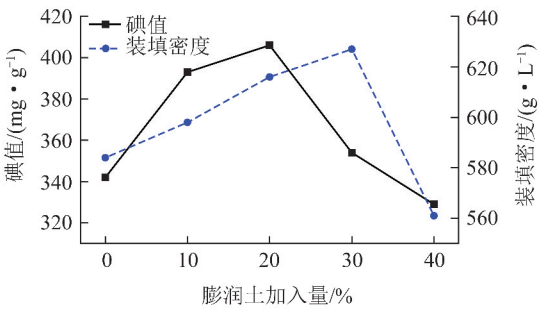


图 3　膨润土加入量对活性焦样品碘值、装填密度的影响

Fig. 3　Effect of bentonite addition on iodine value and loading density of activated coke samples

由图 3 可知，膨润土加入量从 0 增加到 40%，样品碘值先增大后减小。加入量为 20% 时（样品 S2），碘值最大，达到了 406 mg/g；加入量为 40% 时（样品 S4），碘值最小，仅为 329 mg/g。样品 S1、S2 和 S3 的碘值均高于样品 S0（碘值 342 mg/g），这是由于试验使用的膨润土中含有 K、Na、Ca、Fe 等碱金属、碱土金属及过渡金属元素（表 2）对活化过程的碳-水反应具有催化作用[12]，使活性焦的活化程度加深，促进了活性焦孔隙发育，碘值增大。

膨润土加入量从 0 增加到 30%，样品装填密度逐渐增大，加入量为 30% 时（样品 S3），装填密度最大，达到了 627 g/L。这是由于膨润土密度为 2 ~ 3 g/cm^3，而活性焦密度为 0.6 ~ 0.7 g/cm^3，导致活性焦装填密度随着膨润土加入量的增加而增大。样品 S4 在制备过程中出现了严重的破碎、粉化现象，所以碘值和装填密度均低于正常水平。

2.1.2　对灰分、耐压强度、耐磨强度的影响

对 5 种活性焦样品的灰分、耐压强度、耐磨强度进行检测，考察了膨润土加入量对碘值和装填密度的影响，结果如图 4 所示。

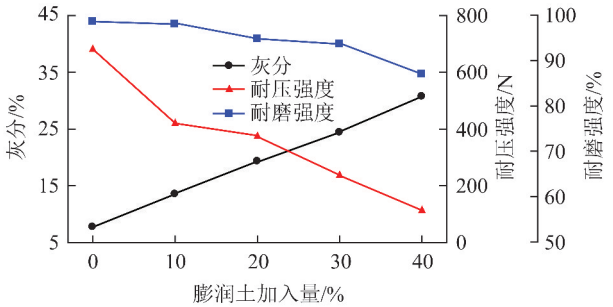


图 4　膨润土加入量对活性焦样品灰分、耐压强度、耐磨强度的影响

Fig. 4　Effect of bentonite addition on ash content, compressive strength, abrasion resistance of activated coke samples

由图 4 可知，样品灰分随膨润土加入量的增加而逐渐增大，无膨润土加入时（样品 S0），样品灰分仅为 7.76%，膨润土加入量为 40% 时（样品 S4），样品灰分达到了 30.75%。这是由于膨润土主要成分为 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 等非金属或金属氧化物，在样品的制备过程中无法完全逸出，最终会以灰分形式留在活性焦样品中。

样品的耐压强度随膨润土加入量的增加而逐渐降低，无膨润土加入时（样品 S0），样品耐压强度为 682 N，膨润土加入量为 40% 时（样品 S4），样品耐压强度仅为 114 N。另外，活性焦样品的耐压强度和灰分呈现明显的负相关性。样品的耐磨强度同样随膨润土加入量的增加而逐渐降低，但除样品 S4 外降幅不大，无膨润土加入时（样品 S0），耐磨强度为 99.2%，膨润土加入量为 40% 时（样品 S4），耐磨强度为 87.6%。

2.2　膨润土黏结剂对活性焦样品孔结构的影响

对 5 种活性焦样品的孔结构参数进行检测，包括 BET 比表面积、总孔容积和微孔容积，结果见表 4。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 4　样品孔结构参数的检测结果

Table 4　Structure parameters of samples

样品	BET 比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	孔容/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	
		总孔	微孔
S0	253.11	0.142 3	0.099 5
S1	314.15	0.147 7	0.119 9
S2	329.70	0.159 6	0.125 1
S3	267.47	0.129 4	0.104 3
S4	237.55	0.123 9	0.094 3

由表 4 可知,试验中制得的活性焦样品比表面积较低,孔隙并不十分发达,说明样品是由炭化料浅度活化制成。总体来看,膨润土加入量从 0 增加到 40%,活性焦样品孔隙发达程度先增大后减小,其中样品 S2 的孔隙最为发达,其 BET 比表面积 329.70 m^2/g、总孔容积 0.159 6 cm^3/g 以及微孔容积 0.125 1 cm^3/g 均最高。受到膨润土中碱金属、碱土金属及过渡金属元素对活化过程碳-水反应催化作用的影响[13],样品 S1、S2、S3 孔隙得到更充分发育,导致其孔隙发达程度均高于样品 S0[14-15]。而样品 S4 由于制备过程中出现了严重的破碎、粉化现象,所以孔隙欠发达。试验中样品孔结构性质表现出的规律与样品碘值规律相似,一定程度上说明碘值可作为快速反映活性炭孔隙尤其是微孔发达程度的指标。

2.3　膨润土黏结剂对活性焦样品脱硝性能的影响

试验中对 5 种活性焦样品的脱硝性能进行了评价,其脱硝效率即 NO 转化率如图 5 所示(按照式(1)计算)。

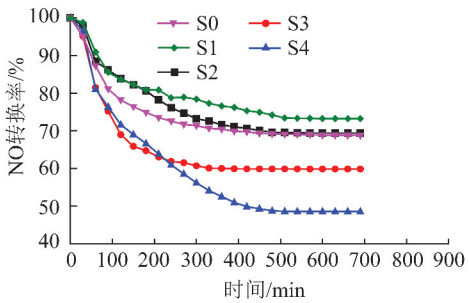


图 5　活性焦样品的 NO 转换率

Fig. 5　NO conversion rate of activated coke samples

由图 5 可知,样品 S2 的脱硝效率最高,达到了 73.2%,样品 S1 和 S0 的脱硝效率接近,分别为 69.4% 和 68.8%。样品 S3 的脱硝效率为 59.9%,样品 S4 的脱硝效率最低,仅为 48.6%。试验使用的膨润土中含有 Fe、Mn 等金属的氧化物(表 2),而根据众多学者对选择性催化还原脱硝(SCR)的研究表明,负载 Fe、Mn、V 等金属氧化物的炭基催化剂能获得更好的催化活性,使得活性焦样品脱硝效率提升[16-18]。总体来看,膨润土加入量从 0 增加到 40%,活性焦样品的脱硝效率先增大后减小,表明使用适量的膨润土黏结剂有利于提高活性焦的脱硝效率。

3　结　　论

1)膨润土可以替代部分高温煤焦油作为制备活性焦的黏结剂。加入量≤20% 时,膨润土黏结剂可以提升活性焦的碘值、装填密度、孔隙发达程度以及脱硝效率;加入量≥30% 时,膨润土黏结剂对活性焦各项性能有明显的负作用。

2)膨润土黏结剂对活性焦的灰分和耐压强度有显著影响,加入量由 0 增至 40%,灰分从 7.76% 增至 30.75%,耐压强度从 682 N 降至 114 N。

3)膨润土加入量为 20%,高温煤焦油加入量为 20% 时,制得的活性焦碘值 406 mg/g,装填密度 616 g/L,灰分 19.33%,耐压强度 375N,耐磨强度 95.4%,比表面积 329.70 m^2/g,脱硝效率 73.2%,具有相对更高的应用性能和更好的经济性。

参考文献(References):

[1] WANG Xinfeng, WANG Wenxing, YANG Lingxiao, et al. The secondary formation of inorganic aerosols in the droplet mode through heterogeneous aqueous reactions under haze conditions[J]. Atmospheric Environment, 2012, 63: 68-76.

[2] 王金华. 我国煤炭高效洁净利用新技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(1): 1-4, 22.
WANG Jinhua. New technology of coal high efficient and cleaning utilization in China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(1): 1-4, 22.

[3] ZHANG Guohua, BI Xinhui, CHAN L Y, et al. Size-segregated chemical characteristics of aerosol during haze in an urban area of the Pearl River Delta region, China[J]. Urban Climate, 2013(4): 74-84.

[4] JULIANA P S S, MANUEL F R P, JOSE L F. Modified activated carbon as catalyst for NO oxidation[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 727-733.

[5] 孙仲超, 王鹏. 煤基活性炭[M]. 北京: 中国石化出版社, 2016: 42-43.

[6] 田斌, 徐亚运, 曾俊, 等. 以煤沥青为粘结剂制备柱状活性炭的工艺参数优化[J]. 广东化工, 2013, 40(16): 11-13.
TIAN Bin, XU Yayun, ZENG Jun, et al. Optimization of preparation parameters in columnar activated carbon with a new binder based

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

on coal tar pitch[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(16):11-13.

[7] 张香兰,王向龙,李科,等. 以聚乙烯醇为粘结剂制备成型活性炭的研究[J]. 洁净煤技术,2008,14(3):23-25.
ZHANG Xianglan, WANG Xianglong, LI Ke, et al. Preparation of formed activated carbon using PAV binder[J]. Clean Coal Technology,2008,14(3):23-25.

[8] 丁佳丽. 非沥青粘结剂煤质活性炭的制备及其用于烟气脱硫的研究[D]. 太原:太原理工大学,2013.

[9] 张金山,郭振坤,荣令坤,等. 钠基膨润土粘结剂在粉煤成型中的研究[J]. 内蒙古科技大学学报,2016,35(3):252-254,268.
ZHANG Jinshan, GUO Zhenkun, RONG Lingkun, et al. Research on sodium bentonite binder in powder coal forming[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2016, 35(3):252-254,268.

[10] 张秋利,胡小燕,兰新哲,等. 膨润土作黏结剂制备型煤的研究[J]. 煤炭转化,2012,35(1):65-68.
ZHANG Qiuli, HU Xiaoyan, LAN Xinzhe, et al. Study on preparation of briquette using bentonite as binder[J]. Coal Conversion, 2012,35(1):65-68.

[11] 郭振坤,贾风军,荣令坤,等. 钠基膨润土对气化型煤制备及型煤热解气体的影响研究[J]. 环境工程,2017,35(5):158-161.
GUO Zhenkun, JIA Fengjun, RONG Lingkun, et al. Effect of addition sodium bentonite on briquette gasification and briquette pyrolysis gas[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(5):158-161.

[12] 解强,张香兰,李兰廷,等. 活性炭孔结构调节:理论、方法与实践[J]. 新型炭材料,2005,20(2):183-190.
XIE Qiang, ZHANG Xianglan, LI Lanting, et al. Porosity adjustment of activated carbon: theory, approaches and practice[J]. New Carbon Materials,2005,20(2):183-190.

[13] 王宇航,梁大明,李兰廷,等. 煤的变质程度对活性炭孔结构影响的研究进展[J]. 煤炭科学技术,2016,44(3):188-192.
WANG Yuhang, LIANG Daming, LI Lanting, et al. Research progress on metamorphic degree affected to pore structure of activated carbon[J]. Coal Science and Technology,2016,44(3):188-192.

[14] 王鹏,解炜,李兰廷,等. 循环脱硫再生过程中活性焦表面性质和孔结构的演变规律[J]. 煤炭学报,2016,41(3):751-759.
WANG Peng, XIE Wei, LI Lanting, et al. Evolution of pore structure and surface characteristics of activated coke during circulations of desulfurization and regeneration[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(3):751-759.

[15] LYDIA S, FREEK K, JACOB A M, et al. Modified activated carbons for the selective catalytic reduction of NO with NH_3[J]. Carbon,1993,31(1):213-222.

[16] 熊银伍. 活性焦联合脱硫脱硝工艺试验研究[J]. 洁净煤技术,2015,21(2):14-19.
XIONG Yinwu. Experimental research of combined removal of SO_2/NO by activated coke[J]. Clean Coal Technology,2015, 21(2):14-19.

[17] MUNIZ J, MARBAN G, FUERTES A B. Low temperature selective catalytic reduction of NO over modified activated carbon fibres[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2000, 27(1):27-36.

[18] 杨巧文,王坤,任艳娇,等. 褐煤基活性焦的制备及脱硝应用[J]. 煤炭科学技术,2013,41(6):122-124,128.
YANG Qiaowen, WANG Kun, REN Yanjiao, et al. Preparation and denitration application of lignite base activated coke[J]. Coal Science and Technology,2013,41(6):122-124,128.